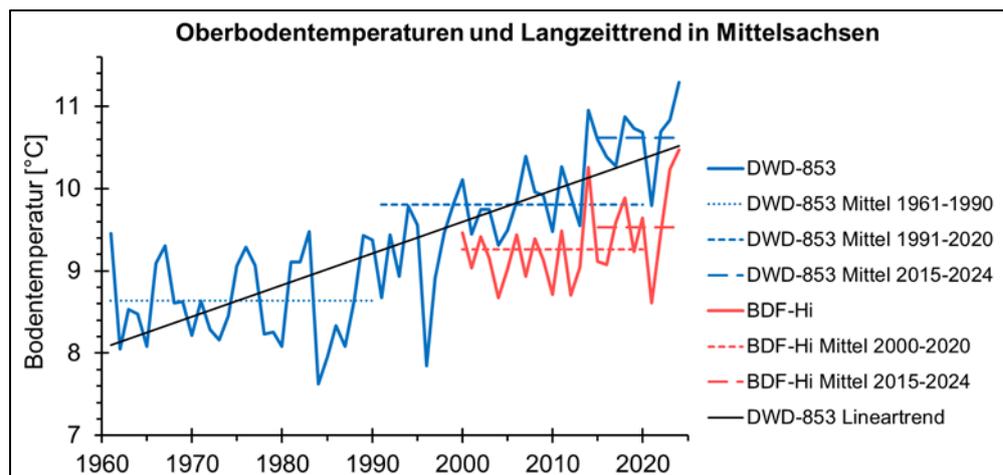


## Klimafolgenmonitoring

I-Bo-1 Bodentemperatur

### Basisinformationen

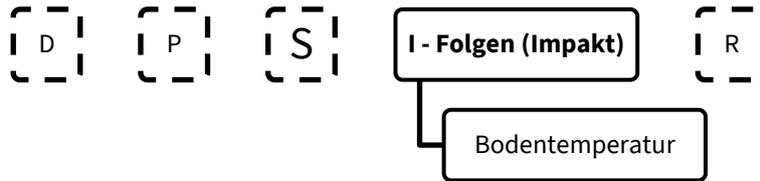
Inhalt	Entwicklung der Bodentemperatur im Ober- und Unterboden an ausgewählten Messstationen in Sachsen.
Klimawirkung	Die Bodentemperatur wird im Wesentlichen durch die Lufttemperatur und den Strahlungshaushalt beeinflusst. Sie unterliegt natürlichen Schwankungen im Tages- und Jahresverlauf, die sich auf biologische, chemische und physikalische Bodenprozesse auswirken. Steigende Bodentemperaturen haben positive und negative Effekte auf das Bodenleben. So steigt die Mineralisierungsrate von Nährstoffen, die von Pflanzen genutzt werden können. Gleichzeitig erhöht sich die CO <sub>2</sub> -Produktion durch eine erhöhte mikrobielle Aktivität im Boden (Onwuka 2016). Höhere (Boden)Temperaturen verursachen außerdem einen Anstieg der Verdunstungsrate, was die Sickerraten in tiefere Bodenschichten reduziert. Der verdunstungsbedingte Wasserverlust kann zu einer Verstärkung der Trockenstressbedingungen und damit Einschränkung der Organismenaktivität führen.



**Abbildung 1: Entwicklung der Bodentemperatur im Oberboden an der DWD-Station 853 (Chemnitz) und der BDF Hilbersdorf**

Inhaltsbeschreibung	Gezeigt werden die Ergebnisse der Trendanalyse von Bodentemperaturen für 46 Messstationen in Sachsen. Neben der Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen wird der Zeitpunkt der Bodenerwärmung im Frühjahr bzw. der Abkühlung im Herbst betrachtet (Über- und Unterschreitungszeitpunkt von 5 °C im Oberboden). Die Temperaturschwelle ist entscheidend für das Pflanzenwachstum und damit für die Länge der Vegetationsperiode landwirtschaftlicher Kulturen.
Befund	An allen betrachteten Messstationen in Sachsen sind ansteigende Bodentemperaturen im gesamten Bodenprofil messbar. In ca. 85 % der Fälle ist dieser Anstieg im Messzeitraum statistisch signifikant.
Inhaltlicher Rahmen	Sächsisches Klimafolgenmonitoring ( <a href="http://Klimaentwicklung.in.Sachsen-Klima-sachsen.de">Klimaentwicklung in Sachsen - Klima - sachsen.de</a> )
Weitere Indikatoren im Handlungsfeld	I-Bo-2 Bodenwasser

## Einordnung und Systematik



DPSIR-Schema

Präambel

Es besteht die Möglichkeit von inhaltlichen und methodischen Abweichungen der Indikatoren im sächsischen Klimafolgenmonitoring von denen anderer Monitoringsysteme. Grund dafür sind unter anderem die Indikatorherleitung und die verwendete Datengrundlage. Entsprechende Indikatoren sind dadurch nur bedingt mit denen anderer Monitoringsysteme vergleichbar.

Bund

BO-I-4 Temperatur im Oberboden (Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) Umweltbundesamt)

Länderinitiative Kernindikatoren → kein Indikator

Andere Bundesländer

C1 Bodentemperatur (LAU Sachsen-Anhalt)

I-BO-3: Temperatur (Zweiter Monitoringbericht Thüringen LUBN)

Sachsen

Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2021

Maßnahmenplan zur Umsetzung des EKP 2021, Nummer 9.03

Thematischer Bezug

I-Ww-2 Grundwasserneubildung

I-Lw-X Vegetationsperiode in der Landwirtschaft

Boden-Dauerbeobachtung Sachsen

## Materialien und Methoden

Indikator

Jahresmitteltemperatur in °C (Grad Celsius) für verschiedene Bodentiefen  
Abweichung  $D$  der Über-/Unterschreitung der Schwellentemperatur von 5 °C im Oberboden in der letzten Dekade im Vergleich zum langjährigen Mittel

Berechnungsvorschrift Jahresmitteltemperatur im Boden

Berechnung der Jahresmittelwerte der Bodentemperaturen verschiedener Tiefenstufen aus Tagesmittelwerten der Messstationen. Es wurden Stationen der Bodendauerbeobachtung (BDF), Agrarmeteorologische Stationen (AMS), Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie Waldklimastationen (WKS) mit Bodentemperatur-Messreihen von mindestens 20 Jahren einbezogen. Für den jeweiligen Messzeitraum wurde der Trend der Bodentemperaturentwicklung für jeden Standort berechnet (lineare Regression und Prüfung der Trendsignifikanz mittels Mann-Kendall-Test mit  $p < 0,05$ ). Zusätzlich wurde der Trend der Lufttemperatur in 2 m Höhe für den Messzeitraum berechnet.

Abweichung Über-/Unterschreitungstag der 5 °C-Temperaturschwelle im Oberboden

Es wurde jeweils der Tag  $d$  des Jahres ermittelt, ab dem die Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen in 5 cm Bodentiefe im Frühjahr über 5 °C steigen (an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen) bzw. im Herbst unter 5 °C sinken. Für den Referenzzeitraum (Messbeginn bis 2014) wurden diese Werte gemittelt ( $d_{ref}$ ) und dem Mittelwert der letzten 10 Jahre (2015-2024) ( $d_{akt}$ ) gegenübergestellt. Die Differenz  $D$  von  $d_{akt}$  und  $d_{ref}$  ergibt jeweils die Zu- oder Abnahme, also das frühere oder

## Klimafolgenmonitoring

spätere Auftreten der 5 °C-Überschreitung ( $D_{>5}$ ) im Frühjahr und der 5 °C-Unterschreitung ( $D_{<5}$ ) im Herbst. Die statistische Signifikanz des Unterschieds von  $d_{akt}$  und  $d_{ref}$  wurde durch Mittelwertvergleich mittels Wilcoxon-Test geprüft ( $p < 0,05$ ).

### Einschränkungen in der Interpretierbarkeit

Die zeitliche Variabilität des Indikators Bodentemperatur ist sehr hoch (vgl. Abb. 1). Infolgedessen sind zuverlässige Trendaussagen erst nach langen Zeiträumen möglich. Durch die Betrachtung von Jahresmittelwerten werden saisonale Effekte nicht berücksichtigt. Die Wirkung von ansteigenden Bodentemperaturen können vielfältig sein und sich gegenseitig beeinflussen (z.B. erhöhte biologische Aktivität durch Temperatureffekt versus verringerte Aktivität durch Trockenstress (erhöhte Verdunstungsverluste)).

Datengrundlage	Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF II) und Agrarmeteorologischen Stationen (AMS) des LfULG, Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Waldklimastationen des Staatsbetriebes Sachsenforst (WKS) Berücksichtigt wurden Stationen mit Datenreihen $\geq 20$ Jahre für Bodentemperaturen (Stand Januar 2025), Messbeginn an BDF, AMS und WKS zwischen 1991 und 2005, bei DWD-Stationen Integration von Daten ab 1961 soweit verfügbar
Zeitliche Auflösung	Jahresmittelwerte, Tagesmittelwerte
Datenverfügbarkeit	Datenherausgabe BDF II auf Anfrage, <a href="#">DWD Stationsdaten (Open Source)</a> , <a href="#">Daten AMS</a> , <a href="#">Daten WKS</a>
Ausblick	Integration weiterer Standorten der bestehenden Monitoringsysteme sobald Messreihen $\geq 20$ Jahre erreicht sind

## Auswertung und Darstellung

Befund	An allen betrachteten Messstationen in Sachsen sind ansteigende Bodentemperaturen im gesamten Bodenprofil messbar. In ca. 85 % der Fälle ist dieser Anstieg im Messzeitraum statistisch signifikant.  Ein zeitigeres Auftreten von Bodentemperaturen $> 5$ °C im Frühjahr wurde an 27 von 32 Stationen beobachtet (durchschnittlich 3 Tage früher). An 28 Stationen wurde ein späteres Auftreten von Bodentemperaturen $< 5$ °C im Herbst festgestellt (durchschnittlich 5 Tage später).
Ergebnisbeschreibung	Die Abbildung 1 zeigt die langjährige Entwicklung der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefenstufen am Beispiel der DWD-Station Chemnitz und der BDF Hilbersdorf. Dargestellt sind jeweils der Verlauf der Jahresmittelwerte im Messzeitraum sowie die Mittelwerte verschiedener Zeiträume (1961-1990, 1991-2020, 2015-2024) und der berechnete lineare Langzeittrend. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Trendanalyse zusammengefasst für alle betrachteten Stationen dargestellt. Ein signifikant positiver Trend der mittleren Jahrestemperatur zeigt den Anstieg der Temperatur in der jeweiligen Bodentiefe über den Messzeitraum an. Negative Trendentwicklungen (langfristig absinkende Bodentemperaturen) traten an keiner der Messreihen auf. Wurde kein statistisch signifikanter Trend festgestellt, waren die Bodentemperaturen über den Zeitraum konstant bzw. es kann derzeit keine eindeutige Aussage zur langfristigen Zu- oder Abnahme der Jahresmitteltemperatur im Boden getroffen werden. Die Gesamtanzahl an betrachteten Stationen je Tiefe variiert sehr stark, da die Temperatursensoren in den verschiedenen Monitoringsystemen in unterschiedlichen Tiefen installiert wurden.

## Klimafolgenmonitoring

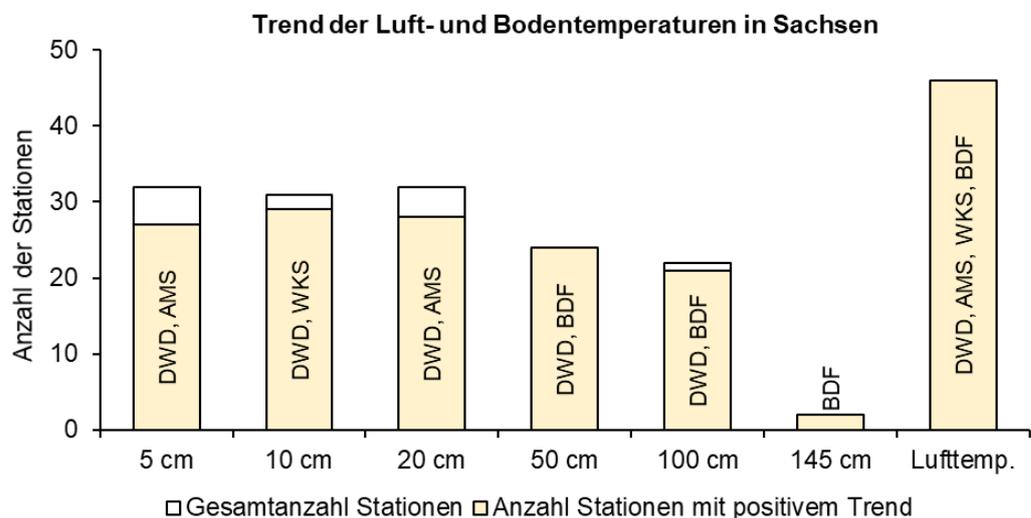
Insgesamt zeigte sich, dass an allen 46 betrachteten Stationen ein statistisch signifikanter Anstieg der Lufttemperaturen innerhalb des Messzeitraums zu beobachten war. Dem entsprechend wurde an fast allen Stationen auch ein Anstieg der mittleren Jahrestemperaturen im Boden festgestellt, der in der Regel im gesamten Tiefenprofil auftrat. Im Oberboden (5, 10 und 20 cm Tiefe) wurde an 85 % der Stationen ein signifikanter positiver Trend festgestellt und im Unterboden (50 und 100 cm) an 97 % der Stationen (Abb. 2). In sehr tiefen Bodenschichten (ca. 145 cm) gab es lediglich an zwei Stationen langfristige Messungen, die beide einen signifikant positiven Temperaturtrend aufwiesen.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen jeweils die Zu- oder Abnahme des Überschreitungstages von 5 °C im Frühjahr ( $D_{>5}$ ) bzw. des Unterschreitungstages von 5 °C im Herbst ( $D_{<5}$ ). Ein negativer Wert der Differenz zeigt jeweils ein früheres Auftreten in der letzten Dekade im Vergleich zum Referenzzeitraum an, ein positiver Wert ein späteres Auftreten. Die 5 °C-Marke kennzeichnet hier einen Mindestwert der Oberbodentemperatur, der für Wachstumsprozesse landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und die Mobilisierung von Nährstoffen im Boden notwendig ist.

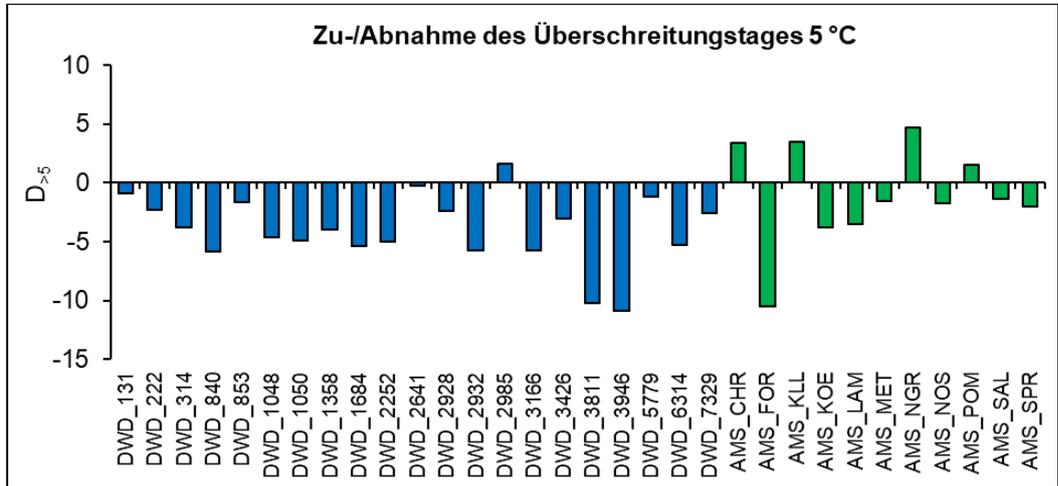
An 27 von 32 Stationen in Sachsen war die Differenz  $D_{>5}$  negativ (Abb. 3), was in der letzten Dekade (2015-2024) eine frühere Erwärmung im Oberboden anzeigt als im langjährigen Mittel. An 5 Stationen war diese Differenz leicht positiv und deutet damit auf eine etwas spätere Erwärmung des Bodens hin.

Der Unterschreitungstag von 5 °C im Herbst (Abb. 4) zeigte für fast alle Stationen ein deutlich späteres Abkühlen der Bodentemperaturen an. An den 28 Stationen mit positiver Differenz traten Bodentemperaturen  $< 5$  °C in der letzten Dekade demnach durchschnittlich 5 Tage später im Jahr auf als im langjährigen Mittel. Der Unterschied zwischen den betrachteten Zeiträumen war an 6 Stationen statistisch signifikant.

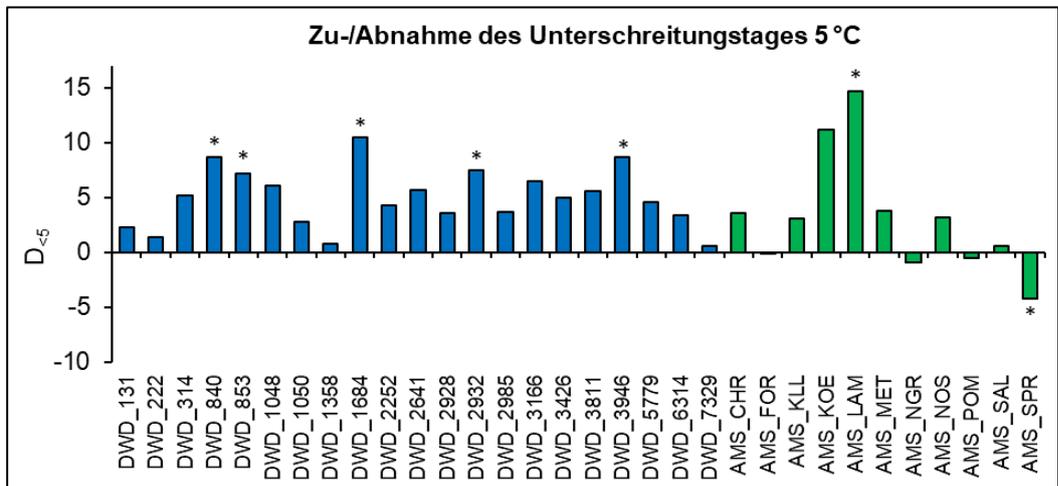
### Abbildungen



**Abbildung 2: Anzahl der betrachteten Stationen je Tiefenstufe insgesamt (weißer Balken) und der Stationen mit signifikant zunehmendem Trend der Temperatur im Messzeitraum (gelb). Messnetze: DWD, AMS, WKS und BDF (siehe Datengrundlage).**



**Abbildung 3: Zu-/Abnahme der Differenzen  $D_{>5} = d_{akt} - d_{ref}$  ( $d$  – Überschreitungstag 5 °C in 5 cm Bodentiefe,  $d_{akt}$  – Mittelwert Dekade 2015–2024,  $d_{ref}$  – Mittelwert Referenzzeitraum von Messbeginn bis 2014). Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen  $d_{ref}$  und  $d_{akt}$  wurden mit \* gekennzeichnet.**



**Abbildung 4: Zu-/Abnahme der Differenzen  $D_{<5} = d_{akt} - d_{ref}$  ( $d$  – Unterschreitungstag 5 °C in 5 cm Bodentiefe,  $d_{akt}$  – Mittelwert Dekade 2015–2024,  $d_{ref}$  – Mittelwert Referenzzeitraum von Messbeginn bis 2014). Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen  $d_{ref}$  und  $d_{akt}$  wurden mit \* gekennzeichnet.**

Entwicklung

Die Entwicklung der Bodentemperaturen folgt an der Mehrzahl der Messstationen (> 85 %) dem signifikanten Anstieg der Lufttemperaturen der letzten 2–3 Dekaden. Die langfristige Erwärmung der Böden erfolgt im gesamten Bodenprofil bis in tiefe Bodenschichten. Im Mittel liegen die Bodentemperaturen der letzten Dekade (2015–2024) in Sachsen 0,6–0,8 °C über dem langjährigen Mittelwert. Für drei DWD-Stationen, an denen Messreihen > 60 Jahre vorlagen, beträgt der Anstieg der Bodentemperaturen in der letzten Dekade 2,2 °C im Vergleich zum Referenzmittelwert 1961–1990.

Die Über- bzw. Unterschreitung von 5 °C im Oberboden hat sich in der letzten Dekade an der Mehrzahl der Stationen hin zu einer früheren Erwärmung im Frühjahr und einer späteren Abkühlung im Herbst entwickelt. Dadurch verlängert sich die Wachstumsphase für Pflanzen und die Periode, in der verstärkte mikrobielle Umsetzungsprozesse im Boden stattfinden können. An einzelnen Stationen war ein schwach gegenteilter Trend oder kein Trend zu erkennen.

## Klimafolgenmonitoring

1. KASPAR TC, BLAND EL, 1992, SOIL TEMPERATURE AND ROOT GROWTH, SOIL SCIENCE 154(4), 290-299
2. ONWUKA BM, 2016, EFFECTS OF SOIL TEMPERATURE ON SOME SOIL PROPERTIES AND PLANT GROWTH, ADVANCES IN PLANTS & AGRICULTURE RESEARCH 8(1), p.34-37, DOI: 10.15406/APAR.2018.08.00288
3. BRIONES MJI, OSTLE NJ, MCNAMARA NP, POSKITT J, 2009, FUNCTIONAL SHIFTS OF GRASSLAND SOIL COMMUNITIES IN RESPONSE TO SOIL WARMING, BIOLOGY & BIOCHEMISTRY 41, p.315-322, DOI:10.1016/J.SOILBIO.2008.11.003
4. TOOSI ER, SCHMIDT JP, CASTELLANO MJ, 2014, SOIL TEMPERATURE IS AN IMPORTANT REGULATORY CONTROL ON DISSOLVED ORGANIC CARBON SUPPLY AND UPTAKE OF SOIL SOLUTION NITRATE, EUROPEAN JOURNAL OF SOIL BIOLOGY (61), p.68-71
5. MEYER M, 2019, QUANTITATIVE BEWERTUNG VON UMWELTINDIKATOREN (SACHVERSTÄNDIGENGUTACHTEN IM AUFTRAG DES UMWELTBUNDESAMTES), UMWELTBUNDESAMT, [HTTP://WWW.UMWELTBUNDESAMT.DE/PUBLIKATIONEN](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)
6. DAVIDSON E, JANSSENS I, 2006, TEMPERATURE SENSITIVITY OF SOIL CARBON DECOMPOSITION AND FEEDBACKS TO CLIMATE CHANGE, NATURE 440, 165–173, DOI: 10.1038/NATURE04514
7. SHARMA PK, KUMAR S, 2023, SOIL TEMPERATURE AND PLANT GROWTH. IN: SOIL PHYSICAL ENVIRONMENT AND PLANT GROWTH, SPRINGER, CHAM. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-3-031-28057-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-28057-3_7)

Autor: Dorit Julich; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie;  
Abteilung 4; Referat 42; Telefon: 03731 294-2806; E-Mail: [Bodendaten.lfulg@smekul.sachsen.de](mailto:Bodendaten.lfulg@smekul.sachsen.de),  
[FachzentrumKlima.lfulg@smekul.sachsen.de](mailto:FachzentrumKlima.lfulg@smekul.sachsen.de); Redaktionsschluss: 31.01.2025; [www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)